



Polymères microstructurables pour la fabrication d'éléments optiques diffractifs

Aurélie Chan Yong, Kevin Heggarty, Christiane Carré, Denis Battarel

► To cite this version:

Aurélie Chan Yong, Kevin Heggarty, Christiane Carré, Denis Battarel. Polymères microstructurables pour la fabrication d'éléments optiques diffractifs. Colloque 2010 CMOI/SFO "Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie", Club CMOI/SFO, Nov 2010, Toulouse, France. hal-01151842

HAL Id: hal-01151842

<https://hal.science/hal-01151842>

Submitted on 13 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Polymères microstructurables pour la fabrication d'éléments optiques diffractifs

Aurélie CHAN YONG, Kevin HEGGARTY, Christiane CARRE, Denis BATTAREL⁽¹⁾,

*INSTITUT TELECOM, TELECOM BRETAGNE, UMR CNRS 6082 FOTON, Technopôle Brest-Iroise
CS 83818, 29238 BREST Cedex 3 ; Université Européenne de Bretagne, France*

(1) HOLOTETRIX, 305 rue Claude Shannon, Technopôle Brest-Iroise, 29280 PLOUZANE, France

1. Introduction

Le but des travaux ici présentés est de fabriquer des éléments optiques diffractifs (EODs) performants, selon un procédé simple à mettre en œuvre et pour un coût raisonnable. Ces EODs doivent répondre aux besoins actuels des industriels qui pourraient utiliser ces composants. En plus de leur fonction optique à réaliser, leurs spécifications s'expriment aussi en termes de propriétés optiques (efficacité de diffraction, résistance au flux laser, transparence), mécaniques (rigidité, dureté), thermiques (stabilité) et chimiques (vieillessement, résistance aux agressions chimiques liées au milieu environnant) qui sont définies par les conditions d'utilisation. Le choix et la mise en forme des matériaux ici choisis sont alors primordiaux.

Au laboratoire, le matériau le plus utilisé dans ce domaine est une photorésine, simple à mettre en œuvre et peu coûteuse. Cependant, les EODs en photorésine ne donnent pas toujours entière satisfaction face aux nouvelles demandes. L'étude s'est alors tournée vers la fabrication d'EODs avec un matériau sol-gel hybride commercialement disponible.

La première partie présente les EODs, leurs applications, ainsi que leur conception. Le paragraphe suivant aborde la fabrication d'EODs selon les procédés mis en place à TELECOM BRETAGNE, où les EODs en photorésine sont obtenus par phototraçage, méthode d'écriture directe. Les EODs en sol-gel hybride sont ensuite fabriqués par moulage à partir de ceux en photorésine. La dernière partie est consacrée à la comparaison des reliefs et des propriétés des EODs obtenus dans les deux matériaux proposés.

2. EOD : définition, applications et conception

Un EOD est un dispositif capable de modifier par diffraction la distribution spatiale d'un faisceau lumineux (Figure 1). La lumière diffractée par l'élément forme plusieurs fronts d'ondes qui interfèrent et se recombinent pour donner naissance à la répartition lumineuse souhaitée, dans le plan de reconstruction.

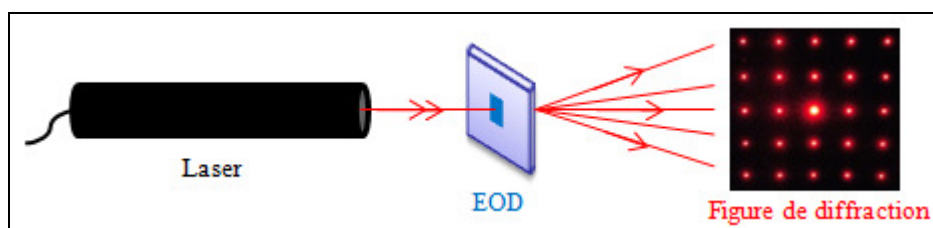


Figure 1 : Représentation simplifiée du rôle d'un EOD

Les EODs peuvent par exemple fonctionner en tant que réseau, microlentille ou encore diviseur de faisceau. Les EODs trouvent de larges applications dans la mise en forme de faisceaux lasers, pour le micro-usinage, la micro-soudure et le micro-marquage par exemple. Leur implication se situe dans divers secteurs, tels que les technologies de l'information (stockage), les télécommunications (multiplexage, démultiplexage), le domaine médical (traitement de cancers) ou la grande distribution (lecture de codes barres). Pour tous ces secteurs, les EODs s'avère être une solution permettant de

limiter au maximum les pertes de lumière, de résoudre les problèmes d'aberrations optiques ou de diminuer l'encombrement stérique d'un montage optique.

Dans notre étude, les EODs [1] agissent sur la phase de l'onde. Pour cela, les différences de marche optique d'un point à un autre correspondent à des variations locales d'épaisseur générées dans le matériau support (Figure 2).

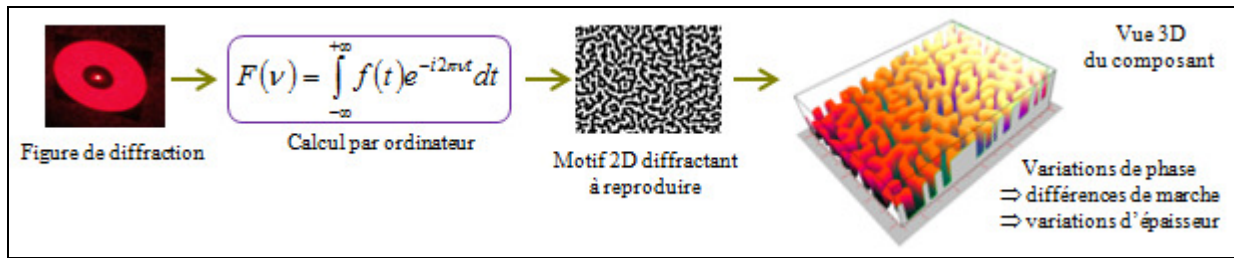


Figure 2 : Conception de la microstructure d'un EOD par ordinateur

Les motifs constituant ce relief sont calculés à partir des caractéristiques de l'onde incidente et de la figure de diffraction souhaitée à la sortie de l'EOD. Le calcul étant effectué par ordinateur, les EODs sont parfois appelés hologrammes synthétisés par ordinateur.

3. Matériaux supports : description et microstructuration

Dans cette étude, la photolithographie est la technique employée pour fabriquer les EODs. Ils sont créés directement par irradiation lumineuse à travers un masque dans une photorésine et indirectement par moulage dans un matériau de type sol-gel hybride à partir de l'EOD en photorésine.

3.1. Inscription directe dans la photorésine (PR)

Le premier matériau mis en jeu est une PR positive commerciale : SHIPLEY S1805 [2], facile à mettre en œuvre et microstructurable par la lumière (Figure 3).

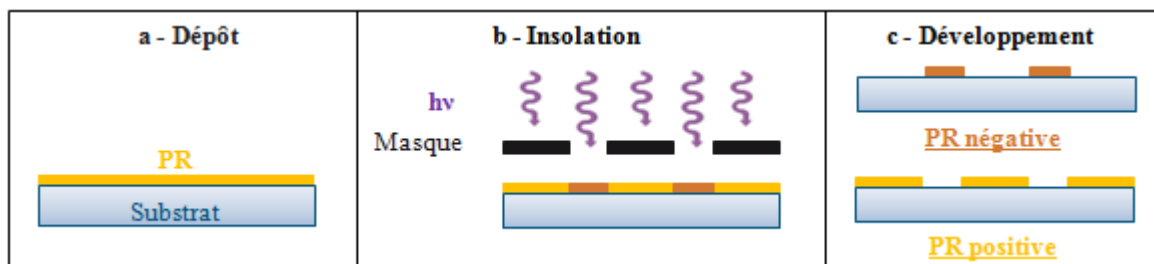


Figure 3 : Principe de mise en œuvre de la PR

Le procédé habituel consiste à déposer la PR sur un substrat par spin-coating (a), puis à l'exposer à la lumière à travers un masque (b) contenant le motif à créer. L'échantillon en PR est ensuite plongé dans un bain de développement (c) pour révéler le motif généré par le masque, dans l'épaisseur du matériau.

Dans nos laboratoires à TELECOM BRETAGNE, la fabrication de l'EOD en PR est effectuée par écriture directe grâce au phototraceur conçu spécialement pour ce besoin [1]. Il fonctionne à 436 nm (longueur d'onde en accord avec le domaine d'absorption de la PR) et utilise comme masque un micro-écran à cristaux liquides, qui a l'avantage d'être reconfigurable selon le motif à créer. Il permet alors de s'affranchir du coût et du délai de fabrication d'un masque. De plus, cette technique, comparée à l'écriture mono-faisceau, est plus performante en termes de rapidité. Elle est parfaitement adaptée au prototypage d'EODs. Le motif à reproduire est imagé dans la couche photosensible grâce à une optique de réduction [1] (Figure 4). Après développement, l'élément subit un post-traitement afin d'acquérir ses propriétés optimales.

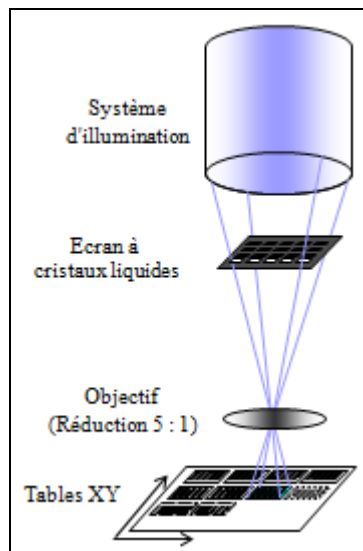


Figure 4 : Fabrication d'un EOD en PR par écriture directe [1]

3.2. Transfert de relief dans un matériau sol-gel hybride (SGH)

Le second matériau proposé est un SGH de la famille des ORMOCER® : l'Ormocomp [3]. Son intérêt par rapport à la PR réside dans le fait que le SGH est un matériau hybride où sont simultanément présentes des composantes inorganiques et des composantes organiques (Figure 5). Les extrémités inorganiques (alkoxysilane) donnent naissance à un réseau minéral par voie sol-gel et confère ainsi à l'EOD des propriétés mécaniques proches de celles du verre (rigidité accrue). Les extrémités organiques comportent deux fonctions polymérisables de type acrylate qui conduisent à la possibilité de micro ou nano-structuration par voie photochimique et permettent ainsi une mise en œuvre similaire à la PR. L'Ormocomp a aujourd'hui fait ses preuves dans le domaine de la nanofabrication [4] et son utilisation est en cours d'optimisation pour notre projet.

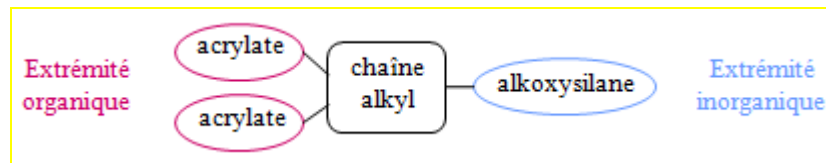


Figure 5 : Structure schématique d'une molécule d'Ormocomp

Ce SGH correspond à une formulation photopolymérisable, disponible à l'état liquide, qui absorbe jusque vers 400 nm et autorise donc l'utilisation de la raie à 365 nm des lampes à vapeur de mercure, mais pas de celle du phototraceur fonctionnant à 436 nm. Par conséquent, la fabrication de l'EOD en SGH repose sur le transfert par moulage du relief initialement créé en PR dans le SGH (Figure 6). Sur cette figure, la hauteur du relief (h) de l'élément binaire (à deux niveaux) ici considéré représente la différence de niveaux créée dans le matériau.

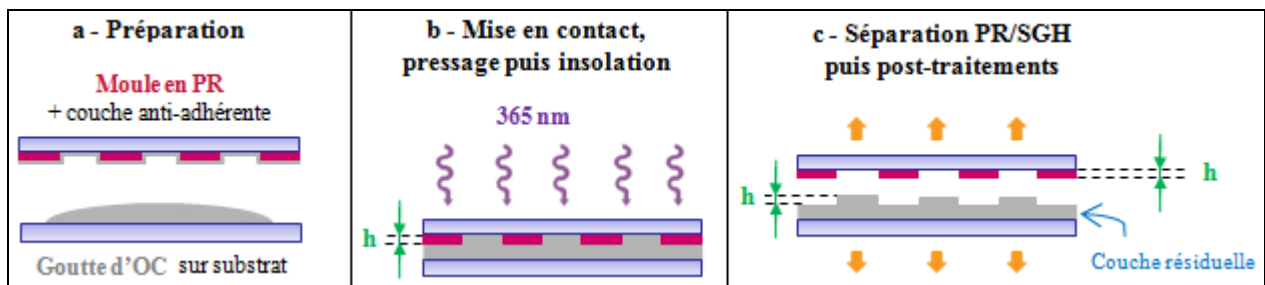


Figure 6 : Etapes de la fabrication d'un EOD en SGH par moulage à partir d'un EOD en PR

Une première étape consiste à appliquer une couche anti-adhérente sur l'EOD en PR et de déposer une goutte de SGH sur un substrat propre (a). Ensuite, la mise en contact de la PR avec le SGH et l'irradiation à 365 nm (b) sont effectuées dans un aligneur de masque (Karl SUSS de type

MJB3), qui permet de travailler dans de bonnes conditions de reproductibilité. Enfin, les deux matériaux sont séparés (étape facilitée par l'anti-adhérent) et l'EOD subit des post-traitements afin d'optimiser ses propriétés (c). Il faut noter que : 1 - le moule en PR ne peut être utilisé qu'une seule fois, il se détériore lors de la séparation ; 2 - la PR est gravée jusqu'au substrat tandis qu'une couche résiduelle de 5 à 10 μm subsiste pour le SGH.

4. Comparaison des EODs en PR et en SGH

4.1. Comparaison des microstructures obtenues en PR et en SGH après moulage

L'objectif est de générer dans le SGH un relief inversé et semblable à celui de la PR. La caractérisation des reliefs correspondant aux EODs et la mesure des hauteurs de relief (Figure 7) sont effectuées à l'aide d'un microscope interférométrique (Nikon Optiphot 100S, équipé d'objectifs interférentiels de Mirau x10, x20 et x50).

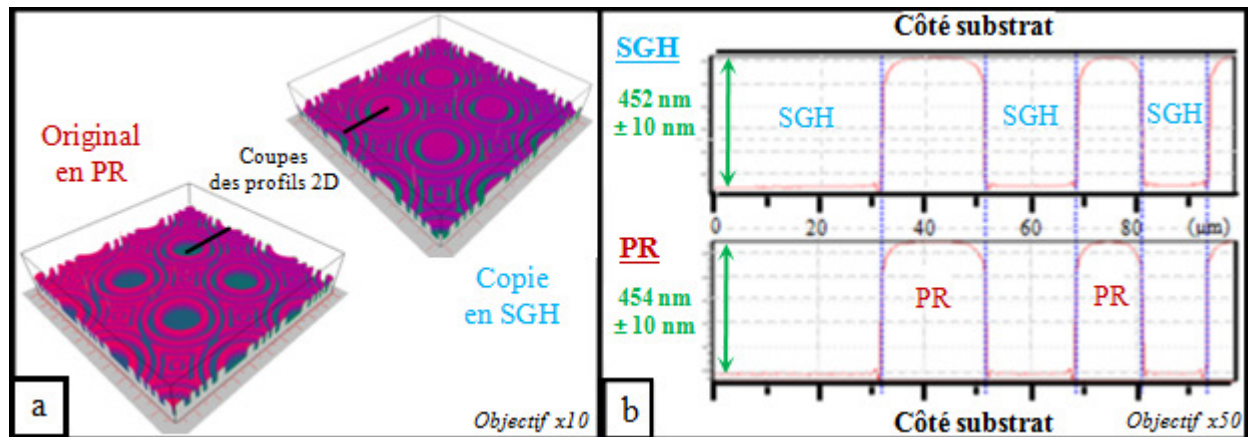


Figure 7 : Comparaison des reliefs restitués en 3D (a) et des profils (b) obtenus par analyse au microscope interférométrique d'un moule en PR et de sa duplication dans le SGH

Les deux reliefs, inverses l'un de l'autre, sont en parfaite concordance et présentent les mêmes hauteurs. La duplication est donc fidèlement effectuée. Le procédé de transfert est ensuite validé au travers de l'analyse et de la comparaison des propriétés correspondant aux différentes microstructures.

4.2. Comparaison des propriétés optiques des matériaux : PR et SGH

L'importance de caractériser la transparence du matériau réside dans le fait de limiter au maximum les pertes de puissance lorsque la lumière traverse l'EOD. Cette analyse repose sur l'enregistrement du spectre en transmission de 300 à 1700 nm (spectromètre UV-visible-proche IR Perkin Elmer Lambda 900, Figure 8).

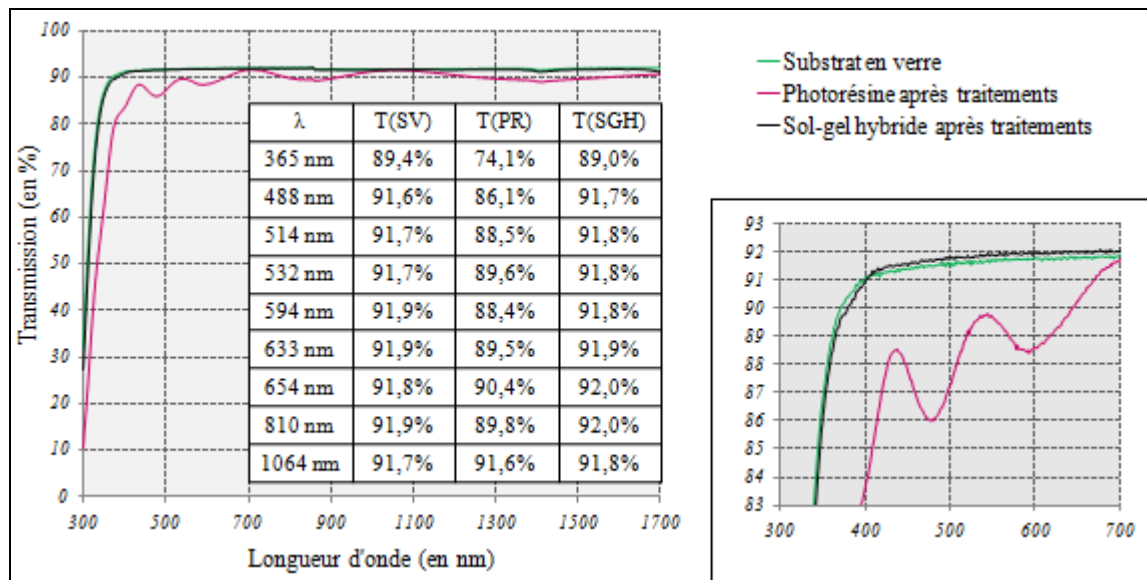


Figure 8 : Spectres en transmission de la PR, du SGH et du substrat en verre

Le spectre obtenu pour un élément en SGH se superpose à celui du substrat en verre seul. Entre 400 et 1700 nm, les taux de transmission dans le visible de l'EOD en SGH et du substrat en verre sont compris entre 90,9% et 92,1%, tandis que celui de l'EOD en PR est fréquemment inférieur à 90%.

S'il y a absorption résiduelle de lumière par un matériau, lorsque l'élément correspondant est irradié, il risque d'emmagasiner de l'énergie au cours du temps, ce qui favorise un échauffement local. Par conséquent, la faible absorption du SGH est un point positif. De plus, une bonne transparence de l'EOD permet d'optimiser son rendement de diffraction, c'est-à-dire d'obtenir des puissances aux ordres de diffraction utiles plus élevées.

Dans ce travail, chaque EOD est aussi caractérisé par son efficacité de diffraction à l'ordre 0 (η_0), mesurée à la longueur d'onde de travail (Figure 9).

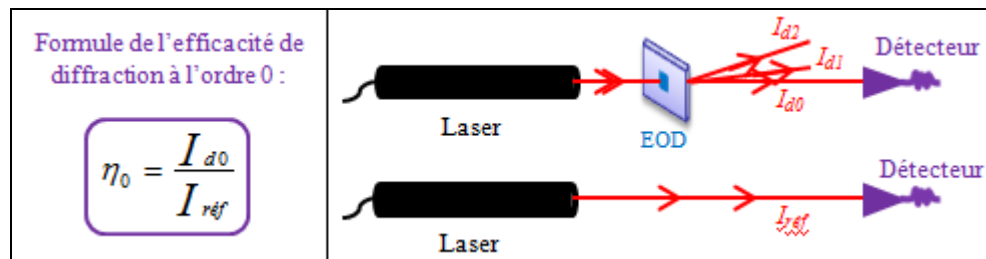


Figure 9 : Mesure de l'efficacité de diffraction à l'ordre 0 à la longueur d'onde de travail avec I_{dn} l'intensité diffractée d'ordre n et I_{ref} l'intensité incidente de lecture

Pour un EOD, il est important que l'intensité lumineuse à l'ordre 0 soit la plus faible possible, afin d'assurer une bonne répartition de l'énergie en chaque point lumineux de la figure de diffraction. Lorsqu'elle est trop élevée, elle est signe d'un défaut de fabrication. Dans le cadre du projet, l'objectif est d'avoir η_0 au moins inférieure à 1%.

Par ailleurs, la relation (R) : $h = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{n - n_0}$ [5] relie λ la longueur d'onde de travail,

$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ le déphasage entre deux niveaux consécutifs, n l'indice de réfraction du matériau et n_0 celui du milieu d'utilisation de l'EOD (Figure 10).

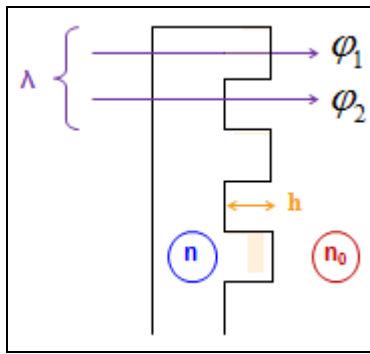


Figure 10 : Illustration des différents termes de la relation (R)

Pour fabriquer un EOD binaire en SGH efficace, le déphasage $\Delta\phi$ doit être égal à π . De plus, sa hauteur $h(\text{SGH})$ vérifie (R) à λ utilisée. Après moulage, la variation d'épaisseur de l'EOD en SGH est similaire à celle de l'EOD en PR : $h(\text{SGH}) = h(\text{PR})$. Les indices de réfraction des matériaux utilisés étant différents pour une longueur d'onde donnée, l'EOD en PR obtenu n'est donc pas optimisé pour λ , mais pour une autre longueur d'onde λ' (Figure 11).

MATÉRIAU	PHOTORÉSINE	SOL-GEL HYBRIDE
Valeurs expérimentales d'efficacité de diffraction d'ordre 0 (motif: anneau circulaire)	0,6% à 633 nm $h(\text{PR})_{\text{exp}} = 523 \pm 10 \text{ nm}$ $h(\text{PR})_{\text{th}} = 494 \text{ nm}$ $n_{\text{PR},633} = 1,64$	0,4% à 532 nm $h(\text{SGH})_{\text{exp}} = 525 \pm 10 \text{ nm}$ $h(\text{SGH})_{\text{th}} = 512 \text{ nm}$ $n_{\text{SGH},532} = 1,52$

Figure 11 : Valeurs des efficacités de diffraction d'ordre 0 optimales pour les EODs en PR et en SGH

Le but est donc d'obtenir des EODs en SGH avec des hauteurs de relief expérimentales h_{exp} proches des valeurs théoriques h_{th} calculées à partir de (R) à la longueur d'onde considérée, ce qui est illustré ci-dessus. Quant à l'EOD en PR, il est optimisé ($\eta_0 < 1\%$) pour une longueur d'onde de 633 nm. Plus généralement, il est possible de fabriquer un EOD en SGH optimisé pour toute longueur d'onde souhaitée en adaptant la hauteur des motifs de l'original en PR.

4.3. Comparaison des propriétés physico-chimiques

Les données relatives aux propriétés physico-chimiques de la PR et du SGH sont regroupées dans le tableau ci-dessous (Figure 13) :

MATÉRIAU	PHOTORÉSINE	SOL-GEL HYBRIDE
Stabilité thermique	145°C [2]	270°C [3]
Rigidité (Module d'Young E)	< 100 MPa (à mesurer)	925 MPa [6]
Tenue aux solvants	Insoluble dans l'eau Soluble dans l'acétone et l'isopropanol	Insoluble dans l'eau, l'acétone et l'isopropanol

Figure 13 : Tableau récapitulatif des propriétés physico-chimiques de la PR et du SGH

En particulier, les éléments en SGH peuvent supporter des températures allant jusqu'à 270°C, sans être détériorés. Ils sont donc plus stables thermiquement que la PR (145°C). Cela peut aussi être un avantage quant à sa tenue au flux laser. Le module d'Young plus élevé du SGH traduit une rigidité supérieure du matériau par rapport à la PR. De plus, la tenue aux solvants usuels, tels que l'isopropanol ou l'acétone, du SGH permet aux EODs correspondants d'être plus facilement nettoyés. Cela élargit leur champ d'utilisation, tels qu'à des milieux industriels et donc leur domaine d'applications.

5. Conclusion

De par ses meilleures propriétés optiques, mécaniques, thermiques et chimiques comparées à celles de la photorésine, l'Ormocer ici proposé apparaît aujourd'hui comme un matériau de choix dans le contexte actuel de miniaturisation croissante des systèmes optiques [4]. En particulier, il devrait

permettre d'atteindre l'objectif aval du projet : proposer une gamme de micro-optiques diffractives répondant à de nouveaux besoins industriels. De plus, cette technique de recopie ouvre la voie à la fabrication de petites séries reproductibles d'EODs en sol-gel hybride, sur mesure, à partir d'un même moule enOrmocer.

6. Bibliographie

1. M.V. KESSELS, M. EL BOUZ, R. PAGAN, K. HEGGARTY, "Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures", J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, vol. 6(3), pp. 033002, 2007
2. http://www.microresist.de/products/room_haas/pdf/Microposit_S1800_G2_Serie.pdf
3. http://www.microresist.de/produkte/ormocer/ormocer_de.htm
4. C. SANCHEZ, B. JULIAN, P. BELLEVILLE, M. POPALL, "Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites", J. Mater.Chem., vol. 15, pp 3559, 2005
5. H. P. HERZIG, "Micro-optics : Elements, systems and applications", Taylor & Francis, 1997
6. S. OBI, "Replicated Optical Microstructures in Hybrid Polymers : Process Technology and Applications", (PhD : Faculty of Science of University of Neufchâtel, Switzerland, 2006)